

出口圆弧半径对低风速风能汇聚影响规律研究

汪依文¹, 叶建军^{1,2*}, 王 威¹, 杜宗钢¹, 蒋鹏程²

¹华中科技大学中欧清洁与可再生能源学院, 湖北 武汉

²华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2021年8月9日; 录用日期: 2021年10月26日; 发布日期: 2021年11月2日

摘 要

聚风装置的结构参数直接影响聚风型风力发电机的输出功率。为了提高聚风装置的聚风特性, 本文重点考察低风速来流风下出口结构参数对聚风效率的影响规律, 通过对直线型出口和五种不同圆弧型出口聚风模型进行数值仿真计算, 对装置内部的流场分布特性进行分析和比较。结果表明, 圆弧型出口聚风装置的聚风性能优于直线型出口聚风装置, 圆弧型线能够有效改善扩张出口的流动分离现象, 提高喉口段的风速, 从而使风力发电机获取更多风能, 提高输出功率。

关键词

低风速风能, 风能汇聚, 聚风装置, 出口结构, 流场特性

Effect of Outlet Structures on Accelerating Performance for the Low-Speed Wind

Yiwen Wang¹, Jianjun Ye^{1,2*}, Wei Wang¹, Zonggang Du¹, Pengcheng Jiang²

¹China-EU Institute for Clean and Renewable Energy, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan Hubei

²School of Power and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Aug. 9th, 2021; accepted: Oct. 26th, 2021; published: Nov. 2nd, 2021

Abstract

The structural parameters of the wind gathering duct directly affect the output power of the

*通讯作者。

文章引用: 汪依文, 叶建军, 王威, 杜宗钢, 蒋鹏程. 出口圆弧半径对低风速风能汇聚影响规律研究[J]. 建模与仿真, 2021, 10(4): 955-961. DOI: 10.12677/mos.2021.104095

shrouded wind turbine. In order to improve the accelerating characteristics of the wind-gathering duct, this paper researches on the effect of the structure parameters of the outlet under the low-grade incoming wind on the wind gathering efficiency. Numerical simulations are carried out on the wind gathering duct with curved sectional outlet and five models with curved tubular structure, and the distribution characteristics of the flow field inside the duct are analyzed and compared. The wind-gathering duct with curved tubular structure can effectively improve the flow separation phenomenon at the outlet, which leads to the higher wind speed in the throat. Meanwhile, the wind turbine can obtain more wind energy and increase the output power.

Keywords

Low-Speed Wind, Convergence of Wind Energy, Wind-Gathering Duct, Outlet Structure, Characteristics of the Flow Field

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着风能资源丰富和环境条件适合的大型风电场趋于饱和,人们逐渐把目光投向面积更广的低风速区域[1] [2] [3] [4]。靠近电网负荷的中东部以及南部大都处于低风速地区,面积约占全国风能资源区域的60%。如果对这些低品位风能资源加以利用,将能提升风能发展潜力并进一步拓宽风能地理利用范围[5] [6] [7]。

针对低风速风能的高效利用,研究证明,给风力发电机加一个适宜结构的聚风罩能够有效提高来流风的密度[8] [9] [10]。Nasution 和 Purwanto 应用数值工具分析比较了圆锥形、曲线型及其优化后扩张聚风装置的轴向速度曲线图,发现流线性扩张聚风装置的聚风性能要优于直线型聚风装置[11]。Ohya [12]针对三种空心聚风结构进行了研究,结果显示扩张型聚风结构对来流风有着更加卓越的加速效果。为进一步考察扩张出口结构对聚风装置整体聚风效率的影响, Ye [13]等人基于收缩-扩张聚风装置提出了一种低品位风能汇聚加速方法,并通过风洞实验验证了数值仿真结果。

基于本团队对直线型收缩-扩张聚风筒的研究,考虑到流线型的聚风结构有着更加优秀的聚风能力,本论文将采用 CFD 数值模拟仿真方法,重点研究流线型出口段母线半径对聚风装置内部流场特性的影响,分析风能汇聚加速影响机理,为低品位风能的有效利用提供理论支撑。

2. 聚风装置物理模型和结构参数

本文研究对象为流线型收缩-扩张聚风加速装置,如图 1 所示,该模型主要由收缩引流口、直筒状喉口,扩张出口三部分组成。收缩引流口母线半径为 R_m ,收缩段圆弧面与喉口的壁面相切,直筒状喉口为工作段,即风轮安装处,长度为 l_{mid} ,直径为 d_m 。扩张出口段长度为 l_{out} ,母线半径为 R_{out} 。

本文的研究主要在于考察出口结构对聚风效率的影响,扩张出口母线为直线的聚风装置设置为参照模型,为进一步提升聚风装置的性能,将扩张出口母线由直线改为圆弧,采用控制变量的方法,保持扩张出口的总长度不变,建立 R_{out} 为 372 mm、472 mm、572 mm、672 mm、772 mm 的聚风装置模型作为对照组,以确定聚风性能更好的模型。

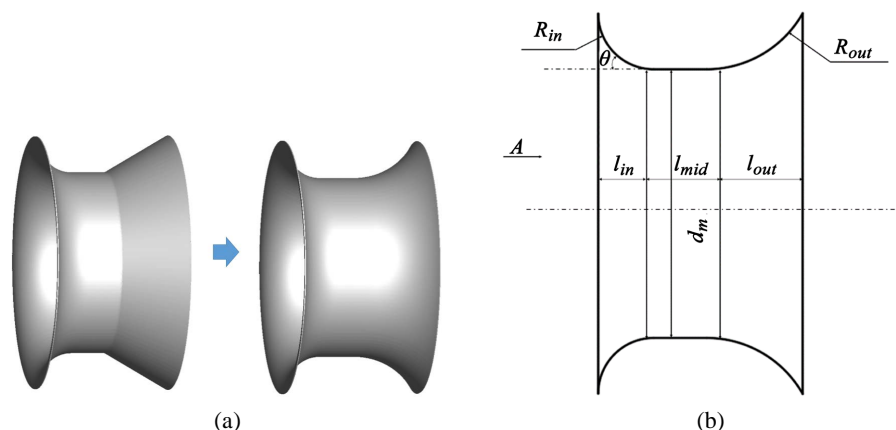


Figure 1. Structural parameters of air gathering duct. (a) The initial structure and the optimized structure; (b) Profile of the optimized structure

图 1. 聚风装置结构。(a) 原聚风装置和改进装置；(b) 改进聚风装置的二维截面图

3. 三维 CFD 模型

3.1. 数值仿真模型

本文主要研究聚风装置内流场运动规律和加速机理，为减小计算边界对结果的影响，数值计算模型采用远场模型和近场模型相结合形式。远场和近场均为圆柱形计算域，远场模型直径和长度均在聚风装置尺寸 15 倍以上，以保证模型周围的流场能够被清楚的展示。采用结构化网格划分，由于本文研究重点在于聚风装置内流场，考虑到壁面的边界层效应，近壁面网格划分较密，并尽可能提高网格质量，靠近边缘密度越小，具体网格划分见如图 2 和图 3 所示。

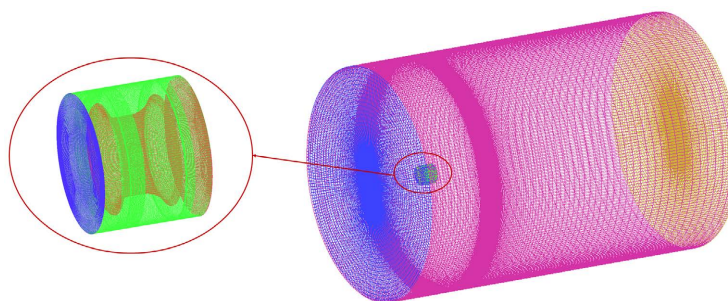


Figure 2. Flow field mesh division

图 2. 流体场网格划分

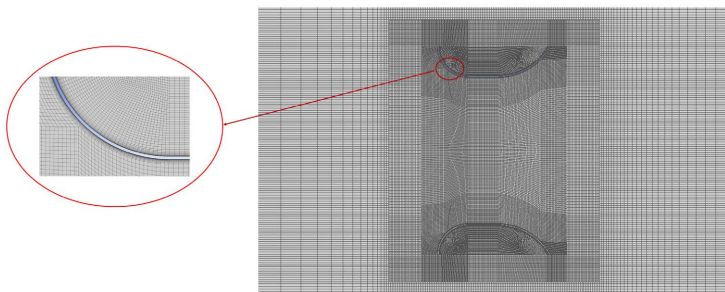


Figure 3. Profile of the grid for the simulated wind gathering duct

图 3. 流体场网格剖面图

3.2. 网格无关性验证

仿真计算结果受网格数量的影响较大, 过少都可能会产生较大的误差, 过多则会影响计算效率。如图 4 所示, 为本文针对不同网格数与喉口中心速度的影响关系。结果显示, 聚风装置喉口中心速度随着网格数的增加逐步趋于稳定, 当网格数量由 3×10^6 增加到 4.8×10^6 时, 相邻两个模型的中心速度相差不超过 0.5%, 因此可以认为当网格数量超过 3×10^6 时, 仿真数值模型的准确度将不受网格数量的限制, 综合考虑计算效率和计算精度, 此后所有模型网格数量都将控制在 3×10^6 左右。

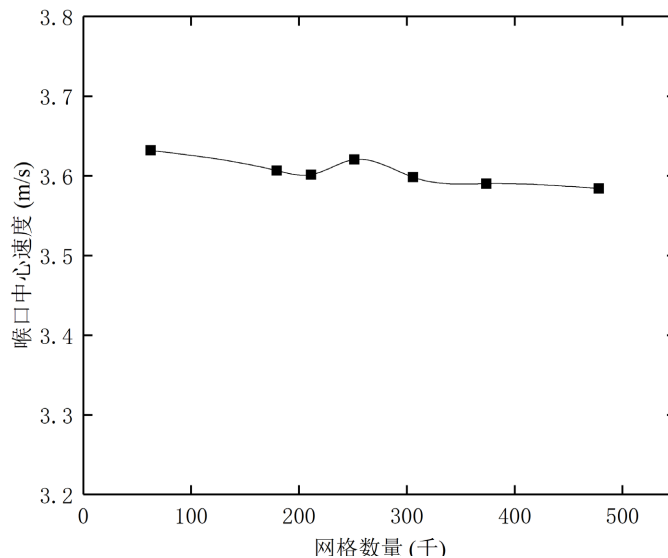


Figure 4. Relationship between throat center velocity and grid number of convergent duct
图 4. 聚风装置喉口中心速度与网格数量关系图

4. 计算结果与分析

4.1. 聚风装置出口负压抽吸加速流动分析

本文所研究的聚风装置提升风速的能力主要来源于收缩段的引流汇聚以及扩张段的负压抽吸作用。图 5 给出了原模型剖面与改进模型($R_{out} = 372 \text{ mm}$)与速度矢量图, 由原模型速度矢量图 5(a) 可以看到, 来流风经过收缩引流口后风速提高, 在喉口工作段形成高风速区, 同时会在扩张出口后端形成一个低压区, 该负压区对聚风装置的聚风效率有着关键的影响, 聚风装置内部流体在负压抽吸的作用下加速向后方流动, 喉口工作段的风速进一步提升。图 5(b) 所示为改进模型速度矢量图, 与原模型相比, 改进模型出口采用曲线扩张形式, 扩张出口母线半径为 372 mm , 与喉口段相切, 连接更加平滑。由图可知, 改进模型流动分离点的位置向后方移动, 流动分离现象有所改善, 且产生的负压区更加集中在扩张出口后端, 产生的抽吸作用更加强烈, 使得空气加速向后方流动, 工作段的风速明显提高, 聚风效率得到进一步提升。

4.2. 出口圆弧半径变化对聚风装置性能的影响

图 6 和图 7 分别给出了对照模型和改进模型的轴截面静压分布云图和速度分布云图。由静压分布云图可知, 收缩引流口前缘静压较高, 越接近内壁面, 静压越大, 对聚风装置内的流动有一定的阻塞作用, 与原模型相比, 改进模型的高压区域面积减少, 流动情况进一步改善。沿轴向观察, 静压值呈现先减小再增大的趋势, 最小静压值位于喉口工作段, 且喉口静压分布沿径向降低。由图 7 速度分布云图可知, 收缩引流口前缘流速降低, 近壁面流速接近 0。结合上述压力分布特性分析, 流体在收缩引流口内壁面

上的阻挡下,实现了动能向压力势能的转化。沿中心轴向观察,流体速度呈现先增大后减小趋势,喉口部分的风速达到最大值,沿喉口径向观察,流体速度先增加,接近壁面速度急剧下降至 0。当出口母线半径由小增大到 572 mm 时,扩张出口发生流动分离的点向壁面后端移动,从而改善流动分离现象,同时也提高了进口附近的压力梯度,促进聚风装置内部流动速度的提升,喉口段的高速区域明显变大,能够获取更多的风能,再继续增大出口半径,喉口中心截面的平均速度下降,不利于聚风装置性能的提升。通过分析速度云图和压力云图可知,在收缩引流口和喉口保持不变的情况下,通过出口直边向圆弧边的改进,能够改善扩张出口段的流动分离现象并增大收缩引流进口的压力梯度,使得聚风装置聚风性能得到提升。

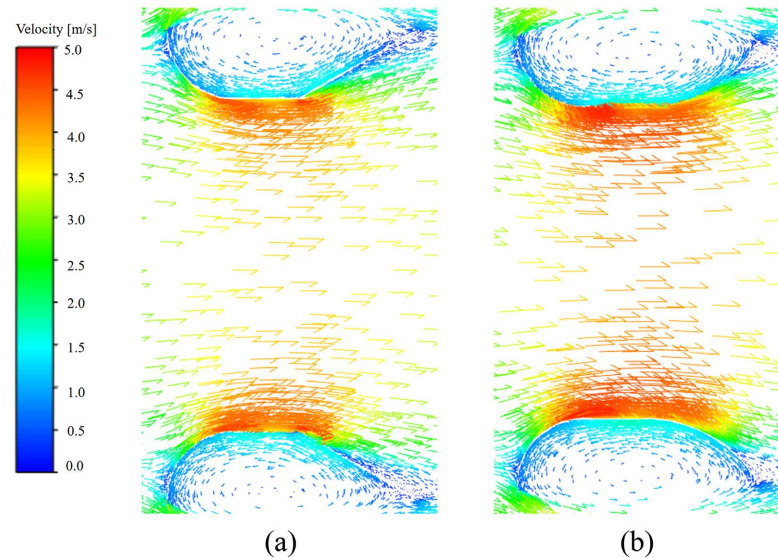


Figure 5. Profile velocity vector map of initial structure and optimized structure ($R_{out} = 372$ mm). (a) Initial structure; (b) Optimized structure ($R_{out} = 372$ mm)

图 5. 原模型与改进模型($R_{out} = 372$ mm)剖面速度矢量图。(a) 原模型; (b) 改进模型($R_{out} = 372$ mm)

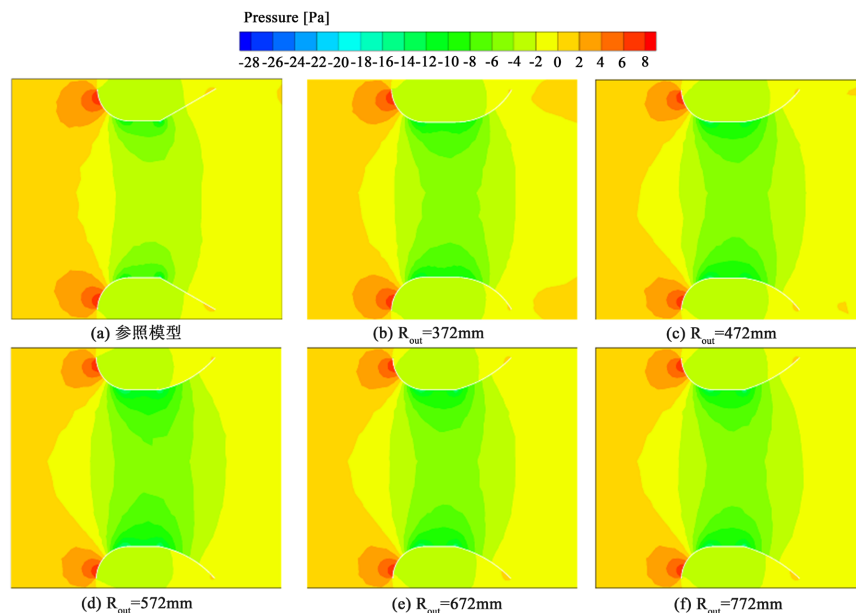


Figure 6. Static pressure contours with different radiuses

图 6. 不同出口圆弧半径对应的静压分布云图

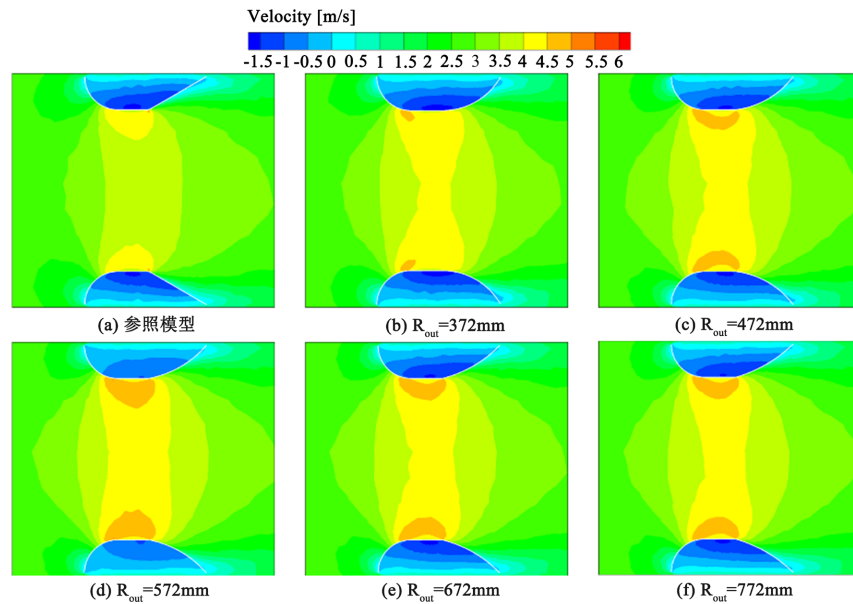


Figure 7. Velocity contours with different radiuses
图 7. 不同出口圆弧半径对应的速度分布云图

4.3. 聚风装置内部风速分析与讨论

在喉口段入口截面沿半径方向每隔 0.05 m 进行取点进行风速计算，总共设置 9 个测量点，图 8 为不同出口圆弧半径时，喉口入口截面测点速度变化图。如图所示，在 3 m/s 的恒定来流风速下，改进模型和参照模型在工作段入口速度分布规律基本一致，风速沿径向增加，在近壁面出现最大风速，然后迅速下降至零。图 7 表明所有优化模型工作段入口的速度均高于原模型，说明将出口段母线由直线改为圆弧曲线起到了优化聚风装置的作用，喉口入口截面测点速度分布曲线随着半径的增大而上升。随着出口圆弧半径的增大，装置的聚风效果先逐渐增大，后又逐渐减小。当 $R_{out} = 572$ mm 时，测点速度曲线最高，近壁面最大流速为 4.88 m/s，将来流风速提高了 1.63 倍，证明了该聚风装置具有加速来流风的作用。当 $R_{out} > 572$ mm 时，工作段入口分布速度曲线有所下降，但是下降幅度减小，可看到 $R_{out} = 672$ mm 和 $R_{out} = 772$ mm 的入口速度分布曲线基本重合。

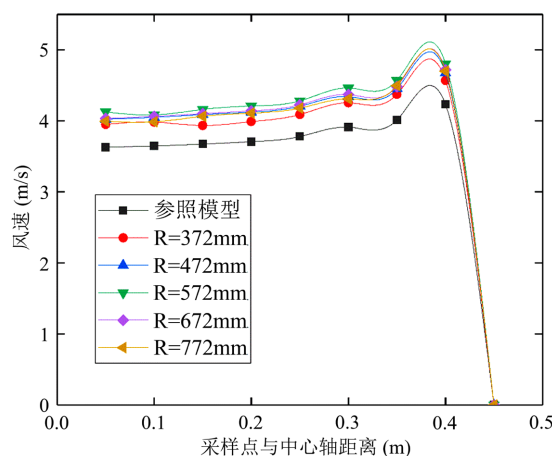


Figure 8. Radial velocity of measuring points at inlet of throat with different outlet radiuses
图 8. 不同出口圆弧半径对应的速度分布云图

5. 结论

本文主要研究不同出口圆弧结构下聚风装置针对低品位风能的聚风提速性能,通过分析不同结构参数的聚风装置内部流场分布特性以及对风能浓缩特性进行量化,得出以下结论:

1) 流线型收缩-扩张聚风装置的聚风性能要优于直线型聚风装置,与直线型扩张出口相比,弧线型扩张出口能有效地改善流动分离现象,发生流动分离的位置明显向扩张内壁面后方移动,同时增加进口的压力梯度,从而提高装置的聚风提速性能。

2) 聚风装置针对低品位风能的聚风特性与出口圆弧结构参数有密切关系,随着出口圆弧半径的增大,装置的聚风效果先逐渐增大,后又逐渐减小。

基金项目

国家自然科学基金(51976067);

低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室开放基金(No. LLEUTS-201905)。

参考文献

- [1] Hosseini, S.R. and Ganji, D.D. (2020) A Novel Design of Nozzle-Diffuser to Enhance Performance of INVELOX Wind Turbine. *Energy*, **198**, Article ID 117082. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117082>
- [2] Xu, Q., Wang, P., Du, Q., Liu, J. and Liu, G. (2019) Effects of Axial Length and Integrated Design on the Aggressive Intermediate Turbine Duct. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, **233**, 443-456. <https://doi.org/10.1177/0957650918797450>
- [3] Stavrakakis, G.S. and Kariniotakis, G.N. (2017) A General Simulation Algorithm for the Accurate Assessment of Isolated Diesel-Wind Turbines Systems Interaction. I. A General Multimachine Power System Model. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **10**, 577-583. <https://doi.org/10.1109/60.464885>
- [4] Gao, C., Wu, J. and Zhang, X. (2013) Analysis of Measures in Improving the Wind Power Generation Capacity in Low Wind Speed Wind Farm. *Wind Energy*, **8**, 56-59.
- [5] Korprasertsak, N. and Leephakpreeda, T. (2016) Analysis and Optimal Design of Wind Boosters for Vertical Axis Wind Turbines at Low Wind Speed. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **159**, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.10.007>
- [6] 李昊璋, 刘苹元, 王锦鸿, 张翼鹏, 陈剑波. 我国风电产业的发展现状分析及未来展望[J]. 机电信息, 2020(21): 91-94.
- [7] 陈光玲. 浅谈我国风电产业发展存在的问题和对策建议[J]. 营销界, 2019(51): 124-125.
- [8] Dilimulati, A., Stathopoulos, T. and Paraschivoiu, M. (2018) Wind Turbine Designs for Urban Applications: A Case Study of Shrouded Diffuser Casing for Turbines. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, **175**, 179-192. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.01.003>
- [9] 姬忠涛, 田德, 韩巧丽. 浓缩风能装置内部流场仿真计算分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 212-218.
- [10] 林俊杰, 田德, 罗涛, 等. 浓缩风能装置扩张凸缘性能仿真研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(4): 1069-1077.
- [11] Nasution, A. and Purwanto, D.W. (2011) Optimized Curvature Interior Profile for Diffuser Augmented Wind Turbine (DAWT) to Increase Its Energy-Conversion Performance. *International Journal of Renewable Energy Research*, **1**, 11-16. <https://doi.org/10.1109/CET.2011.6041483>
- [12] Ohya, Y. and Karasudani, T. (2010) A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-Lens Technology. *Energies*, **3**, 634-649. <https://doi.org/10.3390/en3040634>
- [13] Ye, J.J., Cheng, Y.L. and Xie, J.L. (2020) Effects of Divergent Angle on the Flow Behaviors in Low-Speed Wind Accelerating Ducts. *Renewable Energy*, **152**, 1292-1301. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.068>